Ein automatisches Inversionsverfahren zur Störkörperberechnung, dargestellt am Beispiel einer magnetischen Anomalie südlich von Wörgl/Tirol

Von Alexander Wagini

Mit 17 Abbildungen

(Vorgelegt in der Sitzung der mathem.-naturw. Klasse am 14. Oktober 1983 durch das w. M. F. Steinhauser)

1. Einleitung

Im Sommer 1977 wurde eine aeromagnetische Vermessung Westösterreichs im Auftrag des BMWF vom Institut für Meteorologie und Geophysik der Universität Wien durchgeführt. Die Flughöhe betrug im Versuchsgebiet 3000 m über NN, die Meßprofile, mit einem mittleren Profilabstand von etwa 2 km, verliefen in N-S-Richtung, die Kontrollprofile, mit einem Profilabstand von 11 km, in E-W-Richtung. Bei den Messungen wurde ein Aeromagnetometer Modell G-804 der Firma Geometrics mit einer Empfindlichkeit von 0,05 nT verwendet. Während der Meßflüge wurde in Abständen von je 2 Sekunden die Totalintensität des Erdmagnetfeldes registriert, so daß sich bei einer mittleren Fluggeschwindigkeit von 250 km/h ein durchschnittlicher Meßabstand von 140 m ergibt.

Dabei wurden engräumige Anomalien mit relativ großer Amplitude, die durch oberflächennahe, magnetische Gesteine hervorgerufen werden, festgestellt. Einer dieser Anomalien galt ein besonderes Interesse, zeichnete sie sich doch durch eine sehr hohe Amplitude der aeromagnetischen Anomalie (44 nT in einer Flughorizonthöhe von 3000 m über NN) und der Lage in einem der lagerstättenhöffigsten Gebiete Österreichs aus. Abb. 1 zeigt einen Ausschnitt der aeromagnetischen Karte Westösterreichs, in der die Anomalie aufgeschlossen wurde. Sie liegt noch im Bereich der großen Berchtesgadener Anomalie, doch ihr lokaler Charakter ist durch die scharfe Ausprägung der Anomalie sowie ihres Maximums und des dazugehörigen nördlich vorgelagerten Minimums zweifellos gegeben.

In dieser Arbeit sollen nun die Gestalt des die Anomalie hervorrufenden Störkörpers bestimmt sowie Kenntnisse über seine gesteinsphysikalische Natur ermittelt werden (die Geologie des Meßgebietes ist in Abb. 2 dargestellt). Darüber hinaus soll durch den Vergleich der gemessenen Total- und Vertikalintensitätswerte auf die remanente Magnetisierung des Störkörpers geschlossen werden.

Da der Abstand zweier N–S verlaufender, aeromagnetischer Profile mehr als 2 km beträgt und der Punktabstand längs der Profile etwa 140 m,

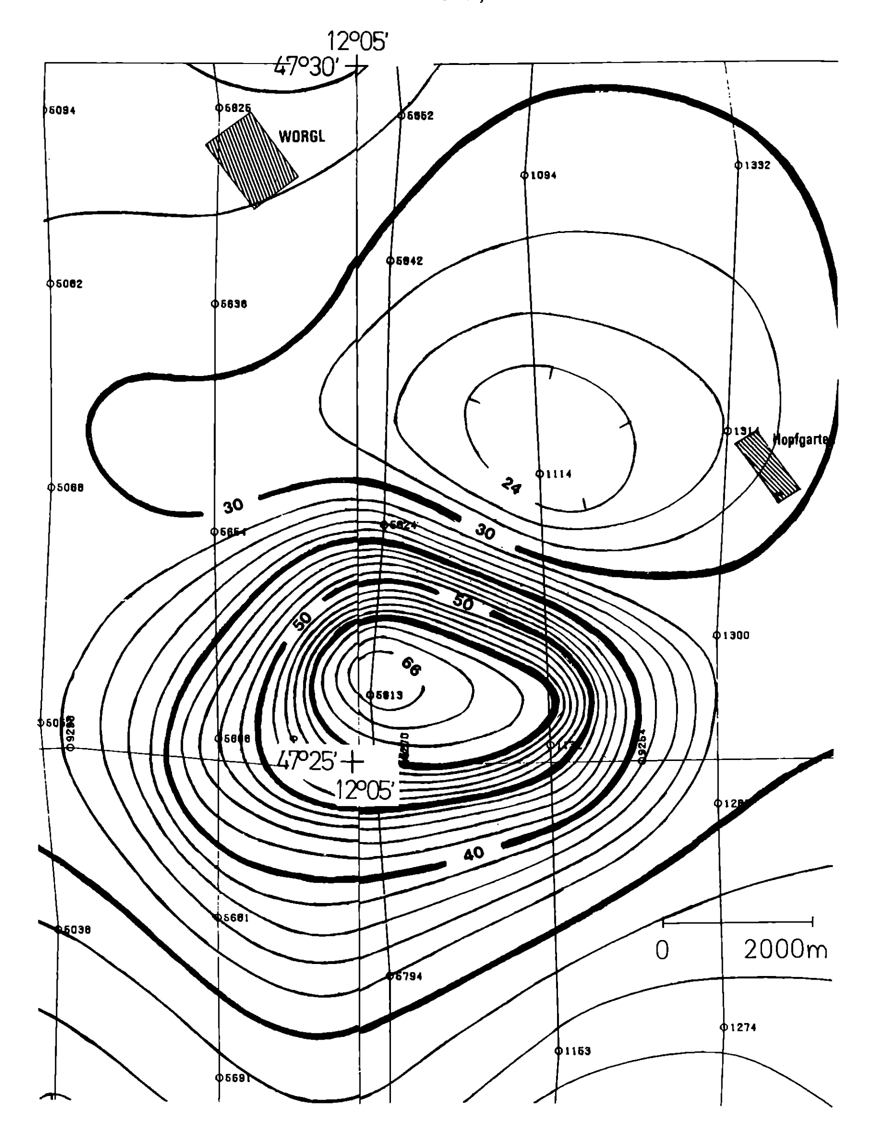


Abb. 1: Ausschnitt aus der aeromagnetischen Übersichtskarte von Österreich, Anomalie südlich Wörgl. Abstand der Isolinien 2 nT, Flugniveau 3000 m, die Fluglinien mit den numerierten Kontrollpunkten sind ebenfalls eingetragen und geben eine Vorstellung von der Genauigkeit der gezeichneten Isolinien.

konnten zunächst infolge des geringen Auflösungsvermögens nur grobe Abschätzungen der Gestalt des Störkörpers durchgeführt werden [5]. Deshalb sollte die genaue Lage und der Detailverlauf der Anomalie durch die Messung der magnetischen Total- und Vertikalintensität am Boden erkundet und damit die Basis für eine genaue Störkörperberechnung ge-

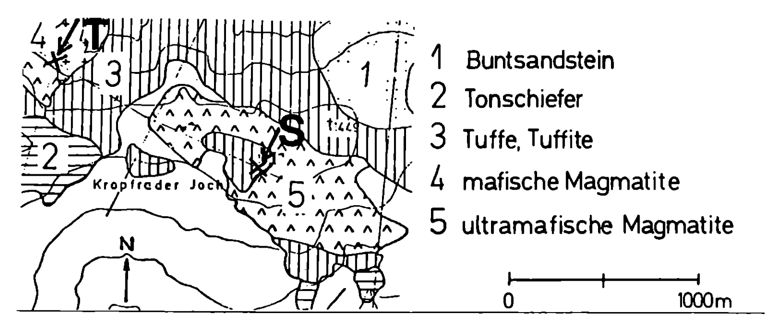


Abb. 2: Die Geologie des Meßgebietes (nach [3]), S, T: Punkte zum Vergleich mit Abb. 4.

schaffen werden. Auf Grund des bereits aus den aeromagnetischen Karten ersichtlichen geringen Verhältnisses der Längsausdehnung zur Querausdehnung des Störkörpers sollte eine dreidimensionale Störkörperberechnung durchgeführt werden, die auf einem Verfahren von TALWANI [6] basiert. Dieses Programm zur dreidimensionalen Störkörperberechnung auf ein automatisches Inversionsverfahren zu erweitern, sollte ein weiteres Ziel dieser Arbeit sein. Es sollte dabei versucht werden, im Gegensatz zur üblichen gleichzeitigen Variation aller Parameter, einen Parameter nach dem anderen zu optimieren. Weiters sollten die Schwierigkeiten, die durch den großen topographischen Unterschied des Meßgebietes verursacht werden, untersucht und berücksichtigt werden (Kapitel 4).

Durch die unabhängigen Messungen der Vertikal- und Totalintensität des Magnetfeldes im Gebiet der Anomalie des Kropfrader Jochs und durch einen Vergleich der Meßwerte an den gleichen Beobachtungspunkten soll versucht werden, auf die remanente Magnetisierung zu schließen (Kapitel 3). Dies ist möglich, da aus den Totalintensitätswerten durch Fouriertransformation die Vertikalintensitätswerte errechnet werden können und deren Abweichung von den gemessenen Z-Werten von dem Vorhandensein einer remanenten Magnetisierung abhängt.

2. Die Vermessung und die Darstellung der Meßdaten

Durch die bei der aeromagnetischen Vermessung Westösterreichs festgestellte magnetische Anomalie ergab sich auch die Größe des Meßgebietes, welches ungefähr eine Fläche von 80 km^2 überspannt (Abb. 3). Die dichte Detailvermessung der Anomalie am Boden beschränkte sich nur mehr auf den Rücken des Kropfrader Jochs, auf eine Fläche von 7 km^2.

Die Messung der Totalintensität des Erdmagnetfeldes erfolgte an ca. 3000 Meßpunkten entlang von überwiegend N–S verlaufenden Profilen mit einem tragbaren Protonenmagnetometer Type G-816 der

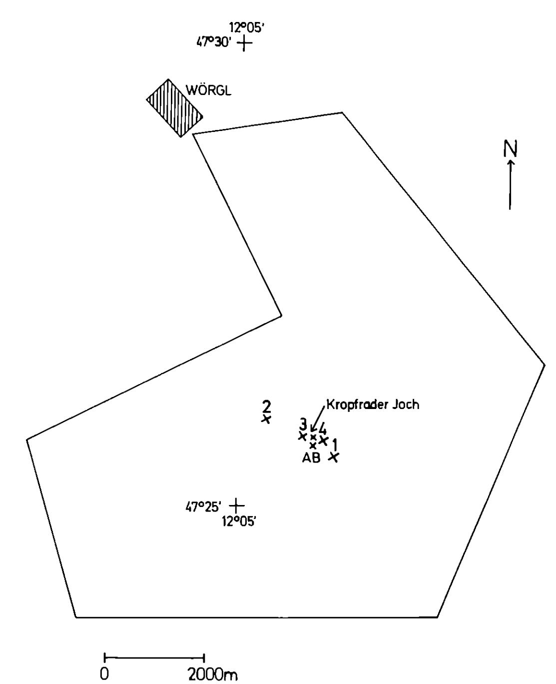


Abb. 3: Grenzen des Meßgebietes und Lage der Aufschlüsse für die Gesteinsproben-entnahme im Bereich der Anomalie des Kropfrader Jochs.

Firma Geometrics. Der Profilabstand betrug ca. 500 m, der Punktabstand längs der Profile 50 m.

Auf Grund des starken Feldgradienten konnten in manchen Gebieten des Serpentinstockes keine sinnvollen Messungen der Totalintensität durchgeführt werden. Es wurden daher im zentralen Teil des Meßgebietes (Bergrücken des Kropfrader Jochs) an ca. 1250 Punkten Messungen der Vertikalintensität mit Hilfe eines Kernsaturationsmagnetometers der Firma Scrintex, Modell MFD-4, vorgenommen. Der Profilabstand der einheitlich in N–S verlaufenden Profile betrug nur 100 m, der Meßpunktsabstand entlang der Profile 50 m.

In Abb. 4 bzw. Abb. 5 sind die Totalintensitäts- bzw. Vertikalintensitätsdaten nach ihrer Korrektur (Säkularvariation, Tagesgang, Normalfeldkorrektur, Höhenkorrektur) dargestellt.

Im gesamten Meßgebiet wurde an ca. 300 Aufschlüssen die Suszeptibilität mit einem Hand-Kappameter Modell KT 3 der Firma Geophysika (ČSSR) mit einer Genauigkeit von $\pm 0{,}02 . 10^{-3}$ SI-Einheiten gemessen, davon im engeren Bereich des Kropfrader Jochs an ca. 200 Aufschlüssen (Abb. 6 und Tab. 1a).

Um Aufschlüsse über die remanente Magnetisierung und über die Suszeptibilität zu erhalten, wurden an vier Aufschlüssen im Bereich des

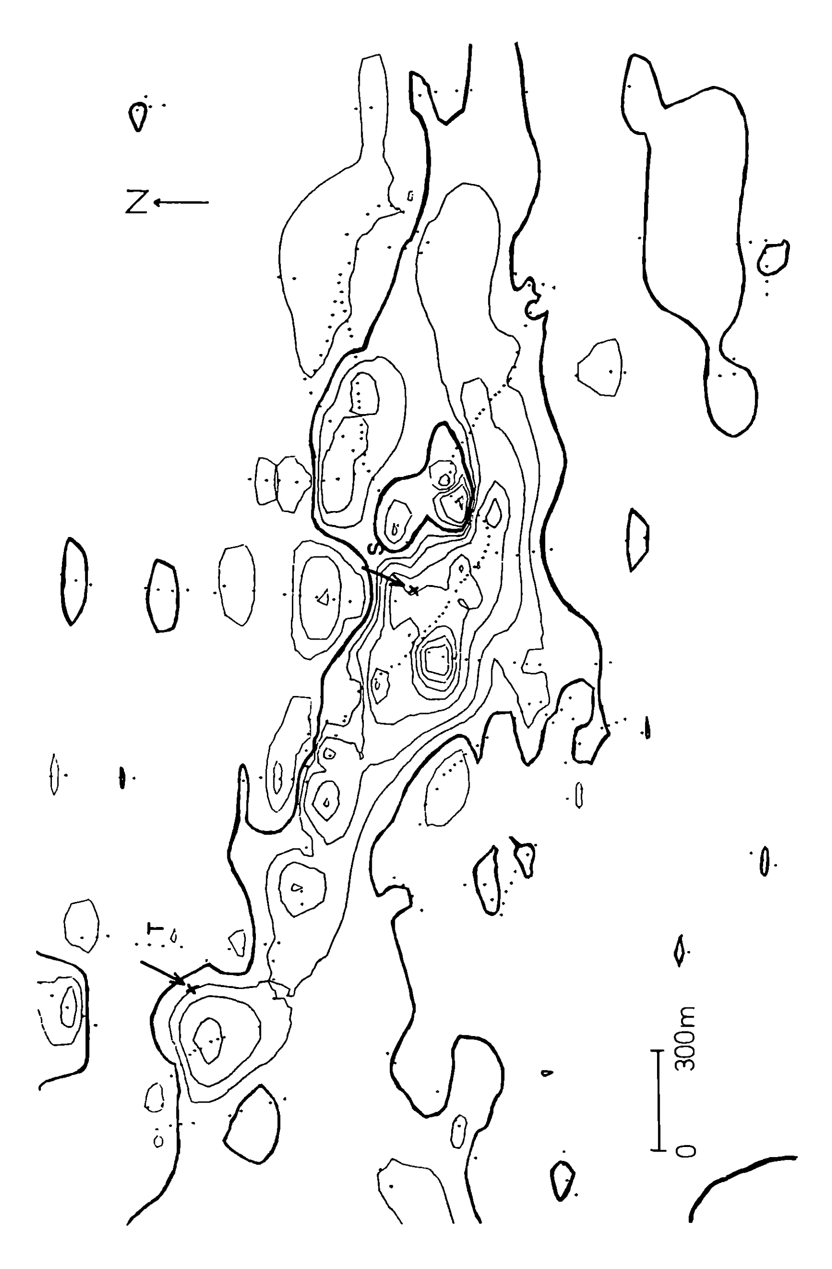


Abb. 4: Isanomalenkarte der Totalintensität mit Meßpunkten, die Null-Linie ist verstärkt gezeichnet, Niveaus der Isolinien: 0 nT, ± 500 nT, ± 1000 nT, ± 2000 nT, . S, T: Punkte zum Vergleich mit Abb. 2.

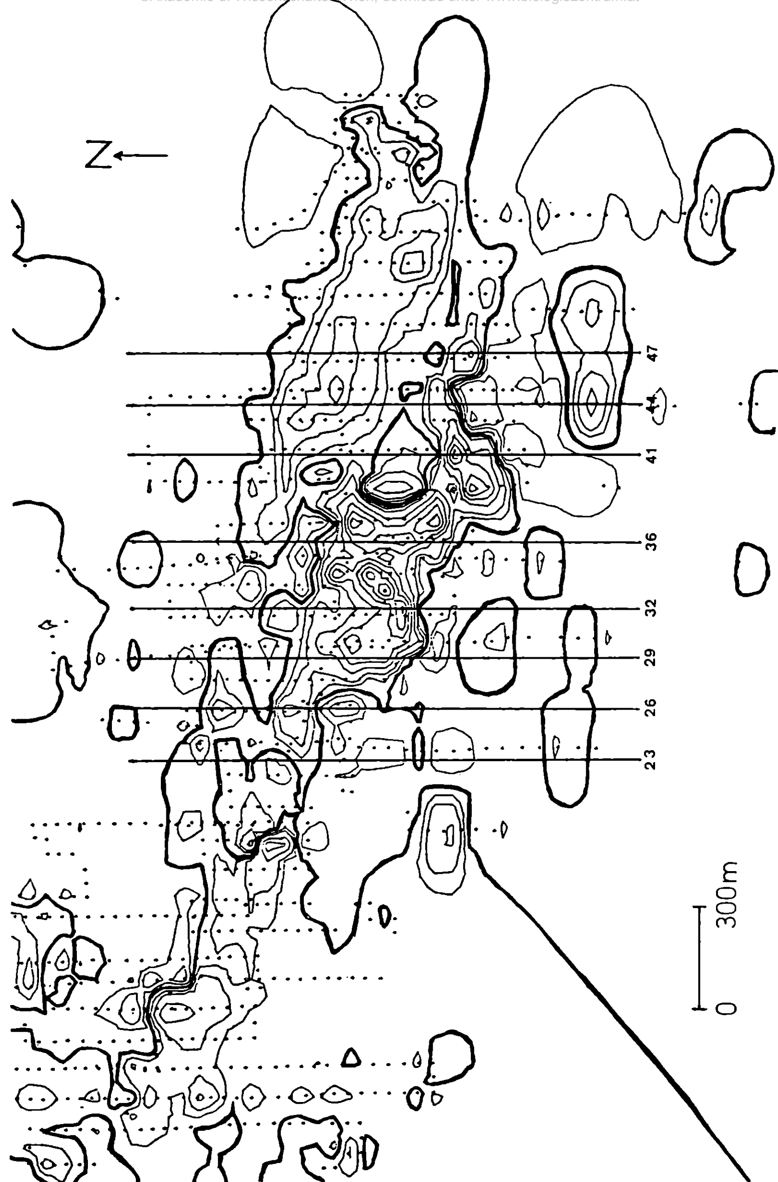
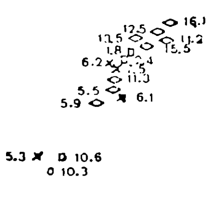


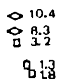
Abb. 5: Isanomalenkarte der Vertikalintensität mit Meßpunkten und den Meßprofilen, auf denen die Variation der Gestalt des Störkörpers durchgeführt wurde. Die Null-Linie ist verstärkt gezeichnet, Niveaus der Isolinien: 0 nT, ± 500 nT, ± 1000 nT, ± 2000 nT,

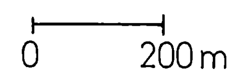
---

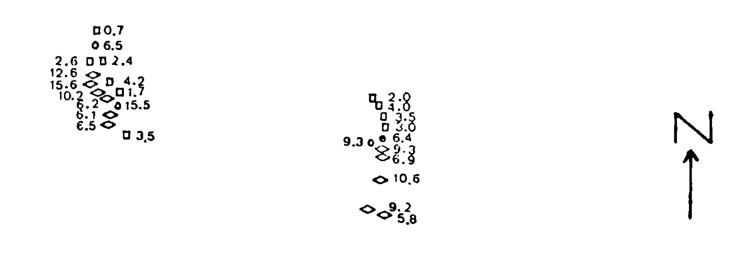
Abb. 6: Die Lage der Gesteinsaufschlüsse, an denen die Suszeptibilität gemessen wurde, und die dazugehörigen Suszeptibilitätswerte. Erklärung der Symbole: □: $\kappa \times 10^3/.2$, ○: $\kappa \times 10^3$, ◇: $\kappa \times 10^3/5$, ×: $\kappa \times 10^3/25$.



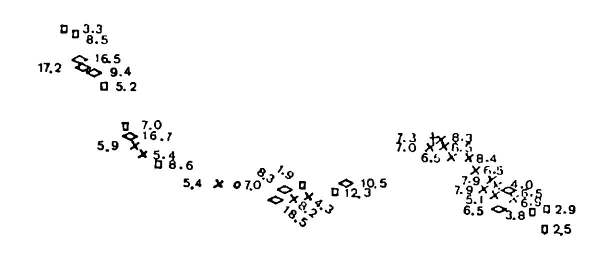
5.3
10.6
10.3
7.6
7.4
4.2
3.2







7.5



8.1
6.2
5.5
19.6
19.9
14.1
5.2
0.5

Kropfrader Jochs 33 orientierte Bohrkernproben entnommen (Tab. 1). Die Bohrproben der Aufschlüsse 3 und 4 weisen deutlich höhere Suszeptibilitätswerte auf als die Bohrproben der Aufschlüsse 1 und 2. Diese Bohrproben hoher Suszeptibilität wurden an Ausbissen des ultramafitischen Störkörpers gezogen, die anderen Bohrproben an dessen Nachbargesteinen. Durch die geringe Anzahl der Bohrproben ist es nicht möglich, eine Korrelation der im Labor gemessenen Suszeptibilitäten durchzuführen, doch liegen die im Labor gemessenen Suszeptibilitäten in der gleichen Größenordnung wie die an diesen Aufschlüssen in situ gemessenen Suszeptibilitäten.

Die Richtung und die Intensität der natürlichen remanenten Magnetisierung wurde mit einem Rotationsmagnetometer der Type UGF-IR3 bestimmt. Es zeigt sich besonders für die remanente Deklination und Inklination eine große Streuung der Werte innerhalb der einzelnen Aufschlüsse, so daß repräsentative Werte für ein Gestein kaum angegeben werden können (siehe Tab. 1).

Tabelle 1: Die Intensität und Richtung der remanenten Magnetisierung und die Suszeptibilität der Bohrproben

Aufschluß	Nr.:	K ($.10^{-6}$ SI-Einheiten)	T (nT)	D	I
1	101	13.486,35	96,1	62,8	18,3
1	102	16.269,27	17,6	53,1	32,1
1	201	13.635,45	20,1	11,4	− 0,8
1	202	18.454,14	63,9	1,0	− 6,9
1	203	21.807,11	68,3	13,6	4,8
1	204	16.160,49	98,1	6,2	12,7
1	205	17.567,88	84,5	11,8	25,5
1	206	3.714,29	15,6	17,6	28,0
1	301	11.464,02	105,8	15,4	5,0
1	302	6.515,08	33,1	9,1	8,6
1	303	1.308,54	7,4	31,8	− 3,6
1	400	16.931,15	65,6	119,4	24,4
2	101	66.176,46	266,0	22,2	23,9
2	102	69.121,37	296,1	19,5	19,5
2	103	37.312,14	218,4	9,2	42,5
2	104	46.630,14	226,4	22,1	29,1
2	105	52.209,03	237,2	43,7	6,9
2	201	57.808,76	203,9	18,4	18,8
2	202	52.678,80	141,0	12,8	−17,8
2	203	39.472,98	213,7	14,1	37,2
2	204	72.688,34	242,2	26,7	6,1
2	301	58.443,47	281,2	45,0	− 0,3
2	302	59.106,63	317,6	29,4	44,1
2	303	56.663,65	207,2	83,8	25,3
2	304	47.305,41	223,6	68,2	30,5
2	305	49.604,83	274,9	28,3	11,3
2	306	64.514,12	248,0	31,8	5,5
2	307	50.054,71	256,4	12,5	23,6
3	104	182.689,13	17.457,0	307,5	35,5
3	122	216.988,06	19.238,0	308,3	34,8
4	111	276.381,48	24.228,0	331,8	25,8

Tabelle 1 a: Häufigkeiten der in situ gemessenen Suszeptibilitäten

K[10^{-3} SI-Einheiten]	Anzahl der Proben n
0– 24	45
25– 49	21
50– 74	19
75– 99	16
100–124	1
125–149	5
150–174	8
175–199	4
200–224	7
225–250	2

Vom Geologischen Institut der Universität Innsbruck wurde eine mineralogische Untersuchung der Bohrproben durchgeführt. In Tab. 2 ist der prozentuelle Anteil an Magnetit, Hämatit, Chromit, Pyrit und Kupferkies der Bohrproben sowie dreier weiterer Gesteine angegeben. Für die Aufschlüsse 3 und 4 konnte ein im Vergleich zu den Aufschlüssen 1 und 21 hoher Anteil an Magnetit gemessen werden.

Tabelle 2: Der prozentuelle Anteil an Magnetit, Hämatit, Chromit, Pyrit und Kupferkies der Bohrproben und dreier weiterer Gesteine im Bereich der Anomalie

Aufschluß	Nr.:	Magnetit %	Hämatit %	Chromit %	Pyrit %	Kupferkies %
1	206	2,6	1,4	–	–	–
1	301	2,0	0,7	–	0,25	–
2	201	6,4	1,0	–	–	–
2	105	4,9	1,5	–	–	–
2	306	4,4	2,0	–	–	–
3	105	11,2	–	–	0,9	–
3	202	14,6	–	–	0,6	–
3	301	12,7	–	–	0,2	–
4	101	11,8	–	0,5	0,2	–
4	201	9,6	–	0,7	0,1	–
4	302	13,2	–	1,8	0,1	–
A		–	5,4	–	0,6	–
B		12,2	–	1,9	0,3	–
C		12,8	–	1,5	0,3	0,1

3. Die Korrelation der Total- und Vertikalintensitätsmeßwerte am Beispiel des Kropfrader Jochs

Durch die Interpolation der Vertikal- und Totalintensitätsmeßwerte auf ein gemeinsames, quadratisches Raster können, da die Messungen unabhängig voneinander durchgeführt wurden, die Meßwerte miteinander verglichen und Aussagen über die remanente Magnetisierung gemacht werden (die theoretischen Grundlagen sind in [1] nachzulesen).

Im Gebiet des Kropfrader Jochs wurde die Vertikalkomponente aus den nach einer Feldfortsetzung um 150 m nach oben transformierten Totalintensitätswerten errechnet und mit den gemessenen und ebenfalls auf 150 m nach oben fortgesetzten Werten der Vertikalintensität verglichen (siehe Anhang). Dieser Vergleich wurde deshalb in einer, um 150 m nach oben fortgesetzten Höhe durchgeführt, da die Meßdichte der Vertikal- und Totalintensitätswerte verschieden ist und dadurch kleinräumige Anomalien, die nur durch eine Messung erfaßt werden, Fehler verursachen können. In einer Fortsetzungshöhe von 150 m werden diese kleinräumigen Anomalien schon soweit unterdrückt, daß sie im Bereich der durch ultramafitisches Gestein hervorgerufenen Anomalie nicht mehr auflösbar sind.

Für die Berechnung der Vertikalintensität aus der Totalintensität wurde vorerst angenommen, daß keine remanente Magnetisierung existiert. Durch den Vergleich der sich aus dieser Annahme ergebenen Werte der Vertikalintensität mit den gemessenen Vertikalintensitätswerten zeigt sich eine gewisse Verschiebung der Anomalie bzw. des Zentrums der Anomalie. Dies läßt auf das Vorhandensein einer remanenten Magnetisierung schließen. Durch die Variation der Inklination und Deklination bei der Transformation der Vertikalintensität aus der Totalintensität wurde nun versucht, diese Verschiebung der Anomalie zum Verschwinden zu bringen. Dazu wurde die Summe der Abweichungsquadrate der errechneten zu den gemessenen Vertikalintensitätswerten an allen Rastereckpunkten gebildet und mit der Summe der Abweichungsquadrate für den angenommenen Fall des Nichtvorhandenseins einer remanenten Magnetisierung verglichen. Derart wurde nun versucht, durch Minimieren der Summe der Abweichungsquadrate die optimale Übereinstimmung der Lage der Anomalie zu erreichen. Bei einer Deklination von 27° und einer Inklination von 51° für das resultierende Feld (induziertes und remanentes Feld) ergab sich das Minimum der Abweichung der gemessenen von den durch Transformation aus den Totalintensitätswerten erhaltenen Vertikalintensitätswerte (die Deklination des induzierten Feldes beträgt 359°, die Inklination 63°).

Dieser Vergleich ist nur dann durchzuführen, wenn für das ganze Untersuchungsgebiet eine einheitlich remanente Magnetisierung angenommen werden kann. Da aber die Anomalie des Kropfrader Jochs wahrscheinlich durch zwei Störkörper mit unterschiedlicher Magnetisierung hervorgerufen wird, kann dies für dieses Gebiet nicht unbedingt angenommen werden.

Um nun festzustellen, ob die resultierende Deklination und Inklination für das ganze Untersuchungsgebiet durch den remanenten Magnetismus des die größere Anomalie hervorrufenden, ultramafitischen Körpers bestimmt wird, wurde das zentrale Gebiet der großen Anomalie detailliert untersucht.

Es wurde wieder die Summe der Abweichungsquadrate bestimmt und versucht, durch Variation der Deklination und Inklination die beste

Übereinstimmung bei der Lage der Anomalie zu erhalten. Ein Minimum der Abweichung ergab sich bei einer resultierenden Deklination von 28° und bei einer resultierenden Inklination von 51°.

Vergleicht man nun die erhaltene resultierende Deklination bzw. die erhaltene resultierende Inklination für das Zentrum der größeren Anomalie mit der des gesamten Untersuchungsgebietes, so ergibt sich für die Deklination eine Abweichung von 1° und für die Inklination keine Abweichung. Dies läßt durchaus den Schluß zu, daß für das resultierende Feld des gesamten Untersuchungsgebietes außer dem induzierten Feld nur der remanente Magnetismus des ultramafitischen Störkörpers, der die größere Anomalie hervorruft, maßgebend ist. Dies wird auch durch gesteinsphysikalische Untersuchungen bestätigt, die das Verhältnis der Intensität der remanenten Magnetisierung des ultramafitischen Störkörpers zu seinen Nachbargesteinen mit etwa 100:1 angibt (siehe Tabelle 1).

Durch die Bestimmung der Richtung des resultierenden Magnetfeldes durch den Vergleich der gemessenen mit den durch Transformation aus den Totalintensitätswerten erhaltenen Vertikalintensitätswerten kann man nun versuchen, die Richtung der remanenten Magnetisierung zu bestimmen. Die resultierende Magnetisierung setzt sich zusammen aus der induzierten und aus der remanenten Magnetisierung. Für die Komponenten der resultierenden Magnetisierung gilt:

$$M_x = M_r \cos I_r \cos D_r = M_i \cos I_i \cos D_i + M_{rem} \cos I_{rem} \cos D_{rem}$$
$$M_y = M_r \cos I_r \sin D_r = M_i \cos I_i \sin D_i + M_{rem} \cos I_{rem} \sin D_{rem}$$
$$M_z = M_r \sin I_r = M_i \sin I_i + M_{rem} \sin I_{rem}$$

M_r = resultierende Magn., D_r = result. Dekl., I_r = result. Inkl.,
M_i = induzierte Magn., D_i = induz. Dekl., I_i = induz. Inkl.,
M_{rem} = remanente Magn., D_{rem} = rem. Dekl., I_{rem} = rem. Inkl.

Um nun die remanente Inklination und Deklination berechnen zu können, ist es notwendig, die Intensität der remanenten Magnetisierung (M_{rem}) zu kennen. Die gesteinsphysikalischen Untersuchungen ergaben für die 2 Bohrungen, die am anstehenden Gestein des ultramafitischen Körpers vorgenommen wurden, einen Mittelwert für die Intensität der remanenten Magnetisierung von ungefähr 20.000 nT. Durch die geringe Anzahl der untersuchten Bohrkerne (3) ist dieser Wert sicher mit einem Fehler behaftet, doch soll er, in Ermangelung besserer Daten, versuchsweise für die Intensität der remanenten Magnetisierung des Störkörpers verwendet werden. Es ergeben sich dann für die Deklination und Inklination der remanenten Magnetisierung, unter der Annahme der Intensität der remanenten Magnetisierung,

$$D_{rem} = 36° \qquad I_{rem} = 42°$$

für den ultramafitischen Störkörper.

Dieses, von den gesteinsphysikalischen Resultaten (siehe Tab. 1) unterschiedliche Ergebnis könnte durch die geringe Anzahl der unter-

suchten Bohrstellen erklärt werden. Durch die Bohrkernentnahme an nur zwei Aufschlüssen des Störkörpers kann nicht unbedingt auf einen für den ganzen Störkörper repräsentativen Wert geschlossen werden, insbesondere nicht für die Deklination und Inklination, da selbst die Probenentnahme in einem stark magnetisierten Gebiet problematisch ist.

Durch die große Anzahl der Vertikal- und Totalintensitätsmeßwerte im Untersuchungsgebiet (zusammen mehr als 2000 Werte) kann die errechnete remanente Deklination und Inklination meiner Ansicht nach, unter Bedachtnahme der geringen Probenanzahl zur Bestimmung der Intensität der remanenten Magnetisierung, als repräsentativ für den Störkörper angesehen werden.

4. Die Störkörperberechnung

4.1. Theoretische Grundlagen

Der Störkörperberechnung lag eine Arbeit von TALWANI [6] zugrunde. In seiner Arbeit wurden speziell für die Durchführung der Störkörperberechnung auf Großrechenanlagen neue Formeln entwickelt, mit denen es möglich ist, die Wirkung eines dreidimensionalen geologischen Körpers von beliebiger Gestalt mit homogener Magnetisierung näherungsweise zu bestimmen. TALWANI ersetzt den Störkörper, dessen Anomalie berechnet werden soll, durch ebene, horizontale Flächen, deren Umrisse durch Polygone angenähert werden. Hierbei kann durch die gewählte Anzahl der Eckpunkte und die Anzahl der Flächen jede gewünschte Genauigkeit der Modelldarstellung erreicht werden. Es werden die Beiträge der einzelnen Flächenbelegungen berechnet und dann über alle Flächen integriert. Die Formeln ergeben gute Näherungen, sofern man mit dem Aufpunkt genügend weit von den Eckpunkten des Störkörpers entfernt bleibt. In der Umgebung der Eckpunkte allerdings wächst das zu berechnende Feld mit $1/R$ (R = Abstand des Aufpunktes zum Eckpunkt) an und wird für $R = O$ singulär. Auf diese Schwierigkeit soll später eingegangen werden.

Durch diese Art der Berechnung der Integrale ist das Auflösungsvermögen der Modellierung des Störkörpers durch den Abstand der Schichten festgelegt; d. h. es besteht keine Möglichkeit, Angaben über die Gestalt zwischen den einzelnen Schichten zu machen. Dies ist sicher eine Schwäche des Verfahrens von TALWANI.

4.2. Die Automatisierung des Verfahrens von TALWANI *nach der Methode der kleinsten Quadrate am Beispiel der Anomalie des Kropfrader Jochs*

Man kann versuchen, die Wirkung des Störkörpers an die gemessene Anomalie mit Hilfe eines automatischen Verfahrens anzugleichen. Solche Verfahren sind schon sehr lange bekannt. L. GEIGER [4] benützte bereits ein Inversionsverfahren zur Bestimmung der Herdparameter. Die Pro-

blematik für all diese Verfahren ist unter anderem die Begrenztheit der Rechenanlagen [2]. Um einen Störkörper durch Eckpunkte gut anzunähern, ist eine relativ große Anzahl von Eckpunkten notwendig. Bei Verfahren, die darauf beruhen, eine große Anzahl von Parametern gleichzeitig zu variieren und damit ein Gleichungssystem von n Gleichungen mit n Unbekannten zu lösen, ist die Grenze des Kernspeicherinhaltes bei kleineren Rechenanlagen bald erreicht. Um nicht die Anzahl der Eckpunkte des Störkörpers und damit die Genauigkeit seines Umrisses reduzieren zu müssen, wäre es notwendig, einen anderen Weg zu wählen. Es geht also darum, die Anzahl der Variablen so gering wie möglich zu halten, ohne die Genauigkeit zu verringern und zu versuchen, diese Variablen nicht gleichzeitig, sondern nacheinander zu bestimmen. Im folgenden soll ein Weg begangen werden, der darauf abzielt, die Probleme der Begrenztheit der Rechenanlagen und der Stabilität der zur Lösung eines großen Gleichungssystems verwendeten Matrizen zu umgehen.

Die gemessenen Vertikal- und Totalintensitätsprofile liegen senkrecht zum Streichen der Anomalie, also in N–S-Richtung. Man wählt nun ein kartesisches Koordinatensystem derart (Abb. 7), daß die Y-Achse parallel zum Streichen verläuft, die X-Achse parallel zu den gemessenen Profilen, und man legt den Koordinatenursprung in eine größere topographische Höhe als die Meßpunkthöhe (Z-Achse positiv nach unten). Um die Gestalt des Störkörpers zu bestimmen, ist es notwendig, einen gewissen Anfangsstörkörper vorzugeben, dessen Gestalt dann zu variieren ist.

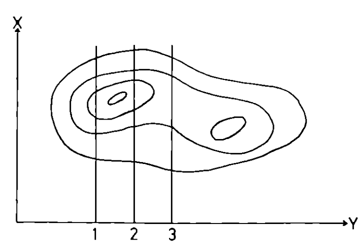


Abb. 7: Koordinatensystem mit drei Meßprofilen 1, 2 und 3.

Man kann die Eckpunkte des Anfangsstörkörpers der einzelnen Schichten so wählen, daß sie immer auf vorgegebenen Profilen zu liegen kommen (Abb. 8). Es sei A eine Schicht des Anfangsstörkörpers, und $BCDP_AEFGQ_AHI$ seien die Eckpunkte, die diese Schicht begrenzen. Legt man zwei Eckpunkte immer gegenüber, so daß sie auf demselben Profil liegen, so ist damit die Ausdehnung des Anfangsstörkörpers in der Tiefe der Schicht A in der X-Richtung vorgegeben. Um die tatsächliche Gestalt des Störkörpers in der Tiefe der Schicht A zu bekommen, ist es jetzt nur noch notwendig, die Ausdehnung des Anfangsstörkörpers längs der Profile zu variieren. Die Begrenzung des Störkörpers in der

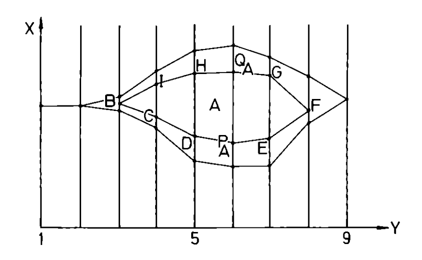


Abb. 8: Lage der Eckpunkte der Schicht A entlang der Meßprofile.

Y-Richtung braucht nicht mehr variiert zu werden, da an den Enden des Störkörpers die Ausdehnung entlang der X-Achse null werden muß.

Wie bei jeder Inversionsaufgabe, nimmt man auch hier ein Versuchsmodell an. Man rechnet aus, welche Meßdaten sich bei Richtigkeit dieses Modelles hätten ergeben müssen, und bildet die Differenz R_i zwischen den tatsächlich gemessenen und den berechneten Werten. Sodann erfolgt durch Variation der Parameter des Modells eine schrittweise Anpassung der gerechneten Daten an die gemessenen.

Es seien nun O_i die gemessenen Werte längs eines Profiles (oder, wegen der Auswirkung der Änderung des Störkörpers auf die berechneten Werte der Nachbarprofile, die gemessenen Werte längs des Profiles und der Nachbarprofile) und C_i die berechneten Werte aus dem Anfangsmodell an den selben Punkten wie O_i. Das Residuum R_i ist dann $R_i = O_i - C_i$ und die Summe der Fehlerquadrate für alle Meßpunkte

$$\sum_i (O_i - C_i)^2 = \sum_i v_i^2.$$

Man versucht nun, durch Hinzufügen eines Vektors δC_i, das Residuum möglichst zum Verschwinden zu bringen. Es bleibt aber im allgemeinen ein kleiner Restfehler w_i übrig:

$$R_i - \delta C_i = w_i.$$

Der Vektor δC_i soll so beschaffen sein, daß die Summe der Fehlerquadrate Σw_i^2 minimal wird.

$$\sum_i (R_i - \delta C_i)^2 = \sum_i w_i^2 \quad \rightarrow \min \quad (1)$$

Durch partielle Differentiation nach δx_j ergibt sich $\delta C_i = \frac{\delta C_i}{\delta x_j} \delta x_j$

und in (1) eingesetzt

$$\sum_i (R_i - \frac{\delta C_i}{\delta x_j} \delta x_j)^2 = \sum_i w_i^2$$

Man erhält somit ein Gleichungssystem von j mal einer Gleichung mit einer Unbekannten bzw. bei n-maligem Hinzufügen der Adjustierungsvektoren n j mal eine Gleichung mit einer Unbekannten. Aus diesen Gleichungen läßt sich dann die kleinste Summe der Fehlerquadrate finden.

In Abb. 9 sieht man in der Tiefe der Schicht A den Vektor $\vec{T}_A^1$, dessen Richtung (entlang der X-Achse) und Betrag vorgegeben sind.

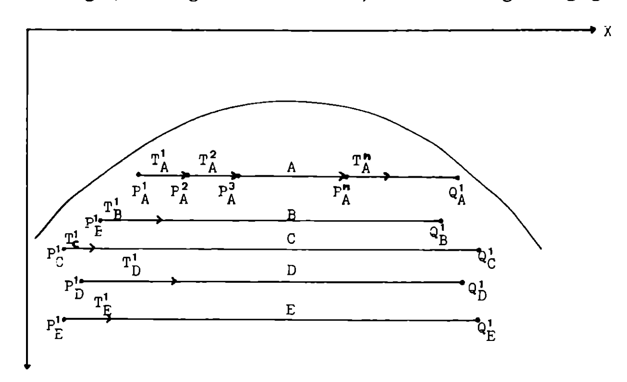


Abb. 9: Zur Ermittlung der x-Koordinate der Eckpunkte durch Hinzufügen von Adjustierungsvektoren.

Bringt die Hinzufügung des Adjustierungsvektors $\vec{T}_A^1$ im Punkt P_A^1 eine Verbesserung des Modells, also eine Verminderung der Summe der Fehlerquadrate, so sei P_A^2 der neue Eckpunkt und T_A^2 der neue Adjustierungsvektor, der in Richtung und Betrag gleich T_A^1 ist. Solange die Hinzufügung eines Vektors T_A^{n-1} eine Verminderung der Summe der Fehlerquadrate ergibt, wird dieses Verfahren fortgeführt. Wird die Summe der Fehlerquadrate durch Hinzufügen eines Vektors T_A^n wieder größer, bleibt P_A^n der Eckpunkt dieser Schicht. Nachdem nun P_A^n bestimmt wurde, wird nun für den Eckpunkt Q_A^1 ein Adjustierungsvektor S_A^1 hinzugefügt. Dieser Vektor ist wiederum parallel zur X-Achse, sein Betrag wird vorgegeben. Wie beim Eckpunkt P_A^1 wird solange das Verfahren durchgeführt, bis auch Q_A^n bestimmt ist.

Entlang eines Profiles werden zu allen Punkten P_i und Q_i nacheinander Adjustierungsvektoren hinzugefügt und dadurch die Summe der Fehlerquadrate minimiert. Nachdem alle Punkte eines Profiles in dieser Weise verbessert wurden, beginnt man wieder mit der Variation des Punktes P_A^n durch einen Adjustierungsvektor, der die gleiche Richtung wie T_A^1 hat, aber dem Betrag nach verschieden (kürzer) sein kann. Dieses iterative Verfahren wird solange fortgesetzt, bis keine Verbesserung mehr durch die Hinzufügung eines Adjustierungsvektors zu den Punkten dieses Profils zustande kommt. Nun werden die Eckpunkte des Nachbarprofils in derselben Weise variiert, bis wiederum durch die Hinzufügung eines Adjustierungsvektors keine Verbesserung mehr erzielt werden kann. In dieser Weise werden alle X-Koordinaten der

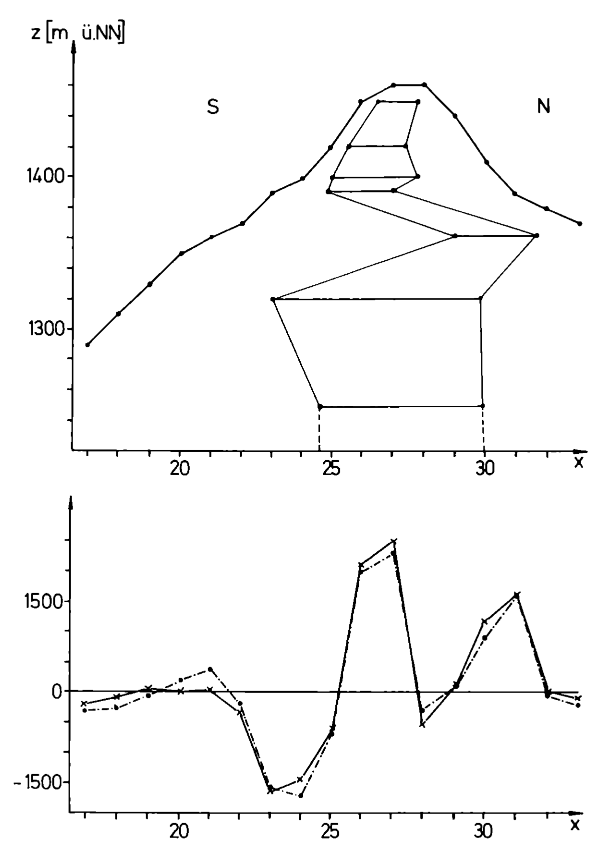


Abb. 10: Auflösung der Anomalie längs des Profils 26 durch die Wirkung eines Störkörpers. Die gemessene Anomalie ist durchgezogen, die berechnete strichpunktiert gezeichnet. Eine Längeneinheit in x-Richtung entspricht 50 m.

Eckpunkte entlang aller Profile nacheinander durch die Hinzufügung von Adjustierungsvektoren derart geändert, daß die Summe der Abweichungen der gerechneten Werte zu den gemessenen Werten zum Minimum wird.

Durch die Änderung der Eckpunkte der Nachbarprofile wird natürlich auch das zuvor minimierte Profil beeinflußt, so daß dieser Vorgang nach der Minimalisierung des letzten Profils beim ersten Profil nochmals begonnen werden sollte. Dies wird wiederum so oft wiederholt, bis die Hinzufügung eines Adjustierungsvektors zu irgendeinem Eckpunkt keine Verbesserung mehr bringt oder die gewünschte Genauigkeit erreicht wird.

In der Praxis ist die Wahl des Anfangsstörkörpers sehr wichtig. Vor allem die Tiefe der Ober- bzw. Unterkante des Körpers sowie die Tiefe einer gewissen Anzahl von Schichten muß relativ genau vorgege-

ben werden. Um die Tiefe der Unterkante des Störkörpers zu bestimmen, betrachtet man vor allem den langwelligen Anteil der Anomalie. Falls der Störkörper an irgendeiner Stelle ausbeißt, so ist an dieser Stelle ein Eckpunkt ein Fixpunkt, der nicht mehr variiert zu werden braucht. Durch diesen Fixpunkt ist somit auch die Tiefe einer Schicht vorgegeben, die zur Beschreibung der Gestalt des Störkörpers notwendig ist. Fehlt nun eine dieser notwendigen Schichten oder ist die Tiefe der Ober- bzw. Unterkante falsch angenommen worden, so läßt sich bei der Störkörperberechnung längs dieses Profils die Summe der Fehlerquadrate kaum auf ein befriedigendes Minimum reduzieren. Das ist somit ein Anzeichen dafür, daß irgendeine Schicht fehlt oder daß die Tiefe der Ober- bzw. Unterkante nicht richtig ist. Die Wirkung einer magnetischen Masse nimmt mit R^3 ab. Deshalb ist es notwendig, zuerst die oberflächennächsten Punkte zu variieren, da ihr Beitrag zur Änderung der Wirkung des Störkörpers am größten ist.

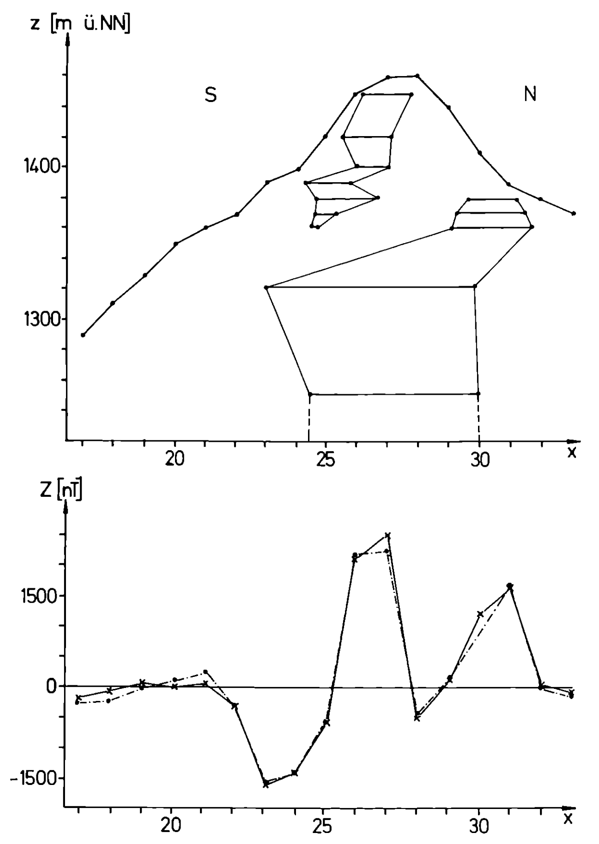


Abb. 11: Auflösung der Anomalie durch die Wirkung zweier Störkörper unterschiedlicher Suszeptibilität. Die gemessene Anomalie ist durchgezogen, die berechnete strichpunktiert gezeichnet. Eine Längeneinheit in x-Richtung entspricht 50 m.

Bei der Berechnung des Störkörpers des Kropfrader Jochs deutete sich bei Profil 26 (Abb. 10) die Möglichkeit an, daß sich der Störkörper aus zwei Teilen zusammensetzt. Auf Grund des Verfahrens von TALWANI gibt es nur die Möglichkeit, daß in einer bestimmten Tiefe nur eine Schicht mit einer gewissen Erstreckung vorkommt; eine Überschneidung von mehreren, nebeneinander liegenden Störkörpern verschiedener Suszeptibilität in der Tiefe ist dabei nicht möglich. Das bedeutet, daß zwei vorhandene Störkörper, unter der Annahme eines einzigen Störkörpers beim Anfangsmodell, auch nicht anders dargestellt werden können wie in Abb. 10. Auch die Isolinienpläne der Vertikal- und Totalintensität des Magnetfeldes deuten darauf hin, daß die Anomalie durch zwei Störkörper hevorgerufen wird. Teilt man den errechneten Störkörper (Abb. 10) in zwei Teile mit verschiedenen Suszeptibilitäten, so ergibt sich auch sofort eine Verbesserung der Anpassung (Abb. 11). Auch bei allen anderen Profilen wird die Annahme von zwei Störkörpern durch eine Verkleinerung der Summe der Abweichungen bestätigt.

Die Variation der Eckpunkte beider Störkörper wird für jeden von ihnen entlang eines Profils getrennt vorgenommen. Zunächst wird der eine Störkörper als konstant angenommen und der zweite entlang eines Profils berechnet; dann wird dieser zweite, verbesserte Störkörper als fest angesehen und der erste verbessert. Dies wird solange fortgesetzt, bis wieder durch Hinzufügung eines Adjustierungsvektors keine Verbesserung mehr erreicht wird.

Bei dem Versuch, den Störkörper durch Hinzufügung eines Adjustierungsvektors zu verbessern, ist jedoch auf drei Bedingungen zu achten:

a) Durch das Hinzufügen des Adjustierungsvektors T_A^n zum Eckpunkt P_A^n darf die X-Koordinate des Punktes P_A^{n+1} nicht die X-Koordinate des Eckpunktes Q_A^1 überschreiten (siehe Abb. 9).
b) Die Eckpunkte einer Schicht dürfen nicht außerhalb des Berges zu liegen kommen.
c) Die Eckpunkte des einen Körpers dürfen nicht die Körpergrenzen des anderen Körpers überschreiten.

Die Grenze der möglichen Annäherung der berechneten Werte an die gemessenen Werte ist durch verschiedene Ungenauigkeiten und durch die Grenzen des Verfahrens von TALWANI gegeben.

Durch den Meßpunktabstand ist das Auflösungsvermögen durch die Grenze der Nyquist-Wellenlänge bestimmt. Ist die Periode kleiner als der doppelte Meßpunktabstand, so kann an dieser Stelle keine Anpassung erfolgen.

Die Wahl des Anfangsstörkörpers ist sehr wichtig, um eine gute Annäherung zu ermöglichen. Abgesehen von der richtigen Tiefe der Ober- bzw. Unterkante des Störkörpers sowie dem Vorhandensein notwendiger Schichten an Ausbissen ist die Anzahl der gewählten Schichten ein wichtiges Faktum. Je mehr Schichten zur Störkörperberechnung verwendet werden, umso genauer kann sein Umriß dargestellt

und umso genauer kann die Anpassung der berechneten Werte an die gemessenen Werte vollzogen werden. Wegen des Rechenaufwandes ist aber die Annahme von nicht allzuvielen Schichten vorteilhaft, so daß hier eine Abwägung zwischen der Genauigkeit der Darstellung des Umrisses des Störkörpers und dem dafür nötigen Rechenaufwand notwendig ist.

Durch die Variation eines Eckpunktes einer Schicht kann es vorkommen, daß der Abstand Meßpunkt–Eckpunkt klein wird. Wird der Abstand Meßpunkt–Eckpunkt sehr klein und somit R sehr klein, so wird der Beitrag dieser Feldanteile sehr groß und hängt nur mehr von dem Abstand Meßpunkt–Eckpunkt ab. Um nun die Auswirkung des Abstandes Meßpunkt–Eckpunkt auf den errechneten Meßwert an diesem Meßpunkt zu untersuchen, wurden theoretische Profile, unter Berücksichtigung der geophysikalischen Parameter des Untersuchungsgebietes, durchgerechnet. In Abb. 12 ist ein solches theoretisches Profil dargestellt. Elf Schichten sind derart angeordnet, daß die Oberfläche des dargestellten Störkörpers völlig eben ist. Ebenso sind die Nachbarprofile gestaltet, um auch in dieser Richtung eine glatte Oberfläche des Berges zu erreichen. Der Umriß des Berges, der gleichzeitig die Meßebene definiert, wurde als eine Gerade parallel zur Oberfläche des Störkörpers angenommen. Somit ist der Abstand Meßpunkt – Störkörperoberfläche für alle Meßpunkte konstant, und es wird vermieden, daß es zu Spitzeneffekten auf Grund von Störkörperkanten bzw. -ecken kommt. In Abb. 12 ist die sich aus dieser Anordnung ergebende Anomalie aufgetragen. Man sieht deutlich, daß sich eine „Schwingung" dem generellen Trend der Anomalie überlagert. Um die Amplitude dieser Schwingung in Abhängigkeit zu der Distanz Meßpunkt–Eckpunkt zu untersuchen, wurde die Meßebene um den Schichtabstand nach unten versetzt. War der Abstand bei Abb. 12 zwischen Meßebene und Störkörperoberfläche gleich dem doppelten Schichtabstand, so beträgt er nun den einfachen Schichtabstand. Dabei wurde die Amplitude der Schwingung wesentlich größer, der Trend der Anomalie blieb aber erhalten. Da durch die Versetzung der Meßebene der Störkörper nicht verändert wurde, also alle Parameter des Störkörpers gleichgeblieben sind, muß die Amplitude der Schwingung eine Funktion des Abstandes Meßpunkt–Eckpunkt sein. In Abb. 13 ist der Abstand Meßebene–Störkörperoberfläche (A) im Verhältnis zur Schichtdicke (B), d = A/B, in der Ordinate aufgetragen, in der Abszisse die Amplitude der Schwingung. Man kann nun aus Abb. 13 für eine gewünschte Genauigkeit die zulässige Annäherung Meßpunkt–Eckpunkt ablesen oder, umgekehrt, für einen bestimmten Abstand Meßpunkt–Eckpunkt die dabei erzielte Genauigkeit.

Ein weiterer Grund, der Ungenauigkeiten hervorrufen kann, ist die Möglichkeit, daß durch die Wahl des schwächer magnetisierten Anfangsstörkörpers die Ausdehnung des stärker magnetisierten Störkörpers durch die Begrenzung des schwach magnetisierten Störkörpers limitiert ist. Damit wird durch das Fehlen von genügend stark magnetisiertem Gestein eine gute Anpassung unmöglich gemacht. In Abb. 14 ist ein solcher Fall dargestellt. Durch die unvorteilhafte Wahl der Gestalt des

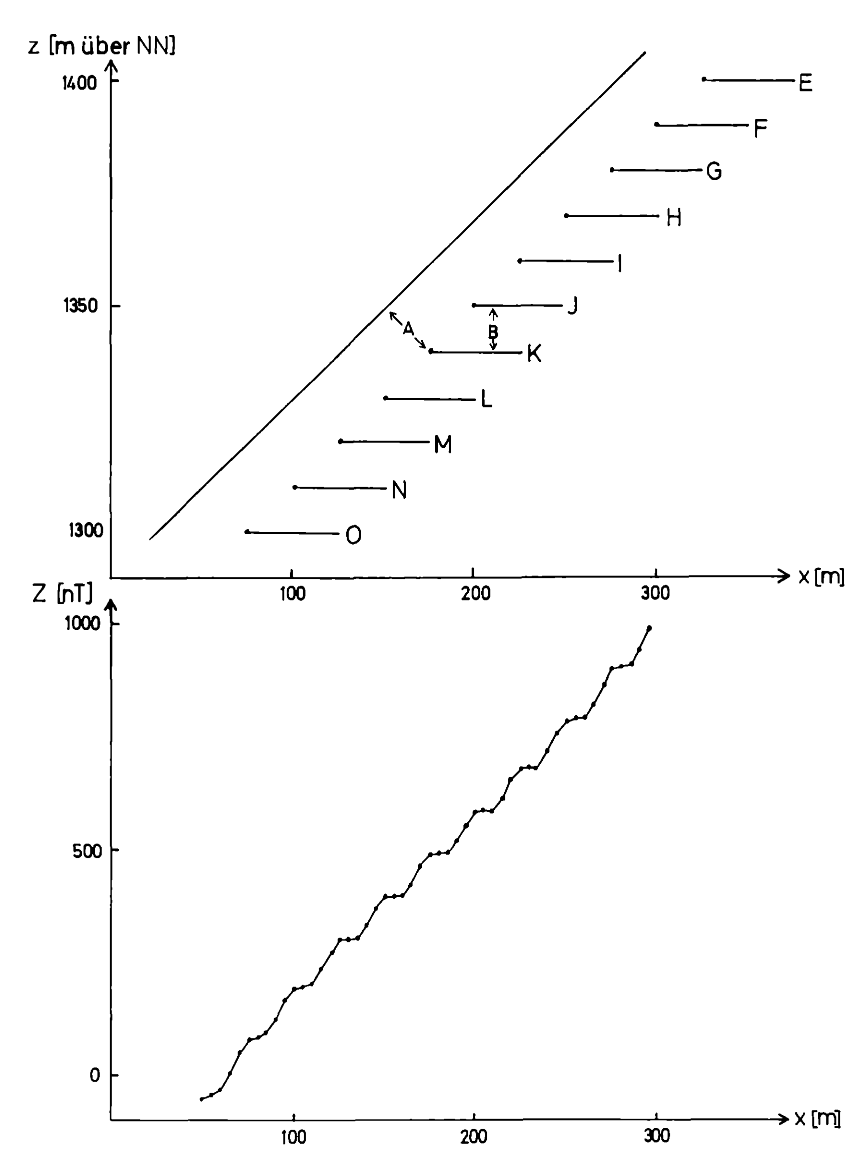


Abb. 12: Oben: Linker Rand der Schichten eines theoretischen Störkörpers. Die Schichten sind nach rechts unendlich ausgedehnt. Das Verhältnis des Abstandes der Meßebene zur Störkörperoberkante A zum Schichtabstand B beträgt 2 1.
Unten: Anomalie zum oben genannten Störkörper.

schwach magnetisierten Anfangsstörkörpers kann sich der stark magnetisierte Störkörper durch die Variation seiner Eckpunkte nur bis zur Körpergrenze (strichlierte Linie) des schwach magnetisierten Störkörpers

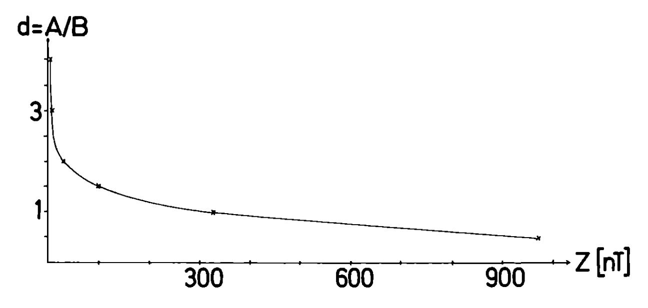


Abb. 13: Amplitude der „Schwingung" der Anomalie als Funktion des Verhältnisses Abstand Meßebene–Störkörperoberfläche A zum Abstand der Schichten B. Hierbei wurden die geophysikalischen Parameter des Untersuchungsgebietes berücksichtigt.

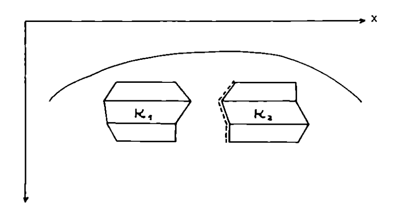


Abb. 14: Grenze der maximal möglichen Ausdehnung des stärker magnetisierten Störkörpers.

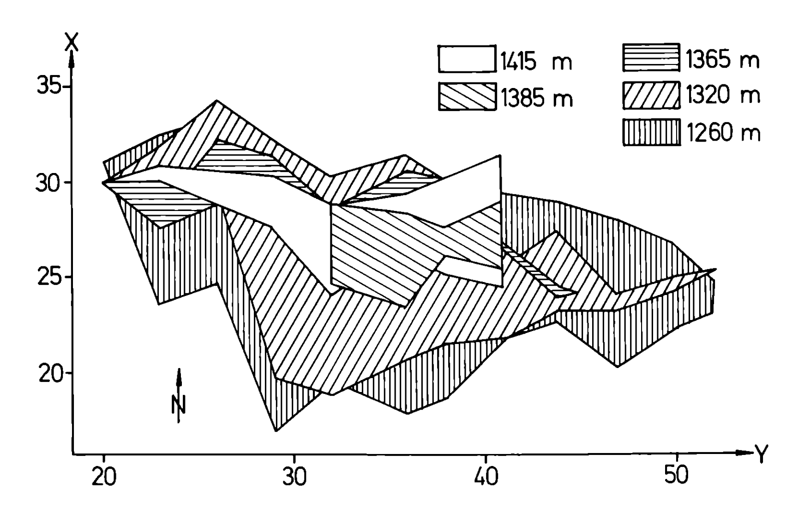


Abb. 15: Räumliche Darstellung des südlichen ultramafitischen Störkörpers in Aufsicht (Höhenlinien der Schichten). Im Sinne einer besseren Übersichtlichkeit sind jeweils mehrere eng beieinander liegende Schichten zu einer mit entsprechend nur einer Höhenlinie zusammengefaßt worden (Längeneinheit 50 m).

ausdehnen. Um die weitere notwendige Ausdehnung des stark magnetisierten Störkörpers zu ermöglichen, wäre es notwendig, die Grenzen des schwach magnetisierten Störkörpers zu verändern. Da aber bei der Variation der Eckpunkte der Schichten, die an der nunmehr herangeschobenen Grenze zum stark magnetisierten Störkörper liegen, eine Verringerung des magnetisierten Gesteins erwirkt werden würde und damit eine Verschlechterung der Anpassung der errechneten zu den gemessenen Werten, bleibt die Veränderung der Lage dieser Eckpunkte aus; d. h.: die Körpergrenze des schwach magnetisierten Störkörpers verschiebt sich nicht, und damit ist auch die weitere notwendige Ausdehnung des stark magnetisierten Störkörpers nicht möglich. Dies kann durch eine bessere Wahl der Anfangsstörkörper verhindert werden oder durch Änderung der Reihenfolge der Variation der Anfangsstörkörper, falls, trotz richtiger Wahl der Gestalt der Anfangsstörkörper, zuerst der schwächer magnetisierte Körper statt des stärker magnetisierten Anfangsstörkörpers variiert wurde.

4.3. Die Störkörpermodelle

Um den ultramafitischen Störkörper, der die größere Anomalie (siehe Abb. 5) hervorruft, in seiner Ganzheit zu erfassen, wurde, wie schon im vorigen Kapitel ausführlich beschrieben, eine dreidimensionale Störkörperberechnung durchgeführt. Da jedoch dieser ultramafitische Störkörper von dem die kleinere Anomalie hervorrufenden Störkörper über- bzw. unterlagert wird, war es notwendig, auch diesen zu bestimmen, um die Wirkung jedes einzelnen Störkörpers zu erhalten.

Die Gestalt des Modellkörpers wurde entlang von acht Profilen variiert (siehe Abb. 5), wobei noch zusätzlich die Lage der Eckpunkte

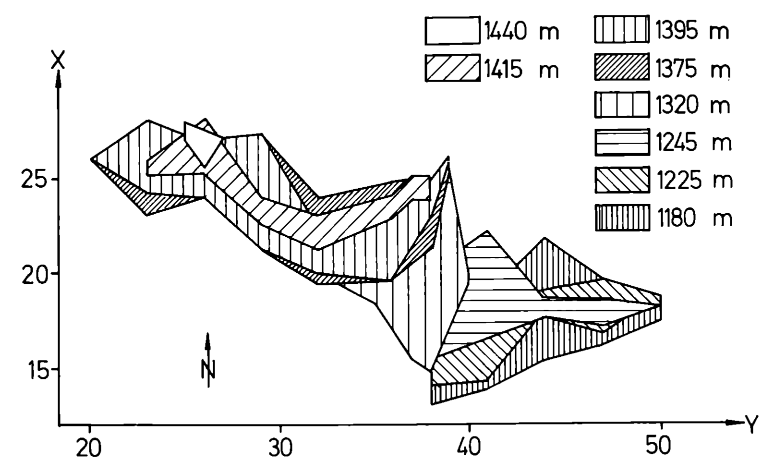


Abb. 16: Räumliche Darstellung des nördlichen, schwächer magnetisierten Störkörpers. Zusammenfassung von Schichten zu einer Höhenlinie und Art der Darstellung wie in Abb. 15.

zweier weiterer Profile berücksichtigt wurde. Infolge des großen topographischen Höhenunterschiedes in Richtung des Streichens des ultramafitischen Störkörpers, also entlang des Rückens des Kropfrader Jochs, und des damit verbundenen Abfallens des Körpers in Richtung Osten, war eine große Anzahl von Schichten (19) zur Darstellung des Umrisses des die größere Anomalie hervorrufenden Störkörpers notwendig (der Niveaustufenplan dieses Störkörpers ist in Abb. 15 zu sehen). Die Gestalt des die kleinere Anomalie hervorrufenden Störkörpers konnte mit 13 Schichten beschrieben werden (Abb. 16). Zur Darstellung der Gestalt beider Störkörper wurden insgesamt 378 Eckpunkte verwendet, wovon 264 Eckpunkte entlang der acht Profile variiert wurden.

Für die Deklination wurde bei der Störkörperberechnung ein Winkel von 359°, für die Inklination ein Winkel von 63°, also die Deklination und Inklination des induzierten Feldes, angenommen. Die Suszeptibilität des die größere Anomalie hervorrufenden südlichen Störkörpers wur-

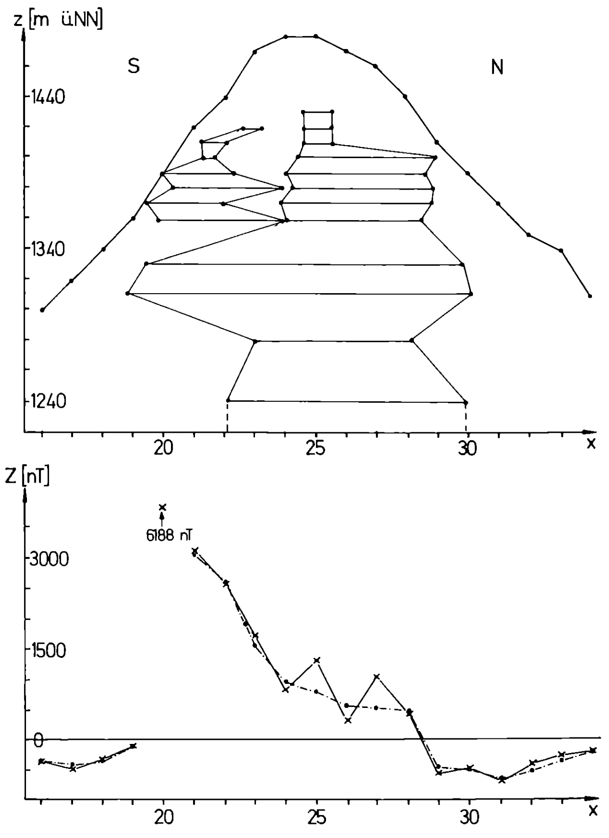


Abb. 17: Gestalt des Störkörpers längs Profil 32 mit dazugehöriger gemessener und berechneter Anomalie (durchgezogen bzw. strichpunktiert gezeichnet). Längeneinheit 50 m.

de mit 20.000 · 10^{-6} cgs-Einheiten, die des die kleinere Anomalie hervorrufenden nördlichen Störkörpers mit 8000 · 10^{-6} cgs-Einheiten berechnet. Für die Tiefe der Unterkante des nördlichen Störkörpers ergab sich ein Wert von 1000 m über NN durch die Untersuchung des langwelligen Anteils der Anomalie. Die Tiefenerstreckung des südlichen, schwächer magnetisierten Störkörpers beträgt also etwa 400 m. Durch die große Tiefe dieses Störkörpers ist der Beitrag der untersten Schicht relativ gering, so daß durch die Variation der X-Koordinate der Eckpunkte dieser Schicht, im Vergleich zur Variation der Eckpunkte einer oberflächennahen Schicht, kaum eine nennenswerte Verbesserung der Anpassung der berechneten an die gemessenen Werte erzielt werden kann. Dies bedeutet, daß die Koordinaten der Eckpunkte dieser Schicht nur sehr ungenau bestimmt werden können. Diese unterste Schicht ist deshalb auch auf den Abbildungen nicht dargestellt.

Als Beispiel sind im unteren Teil der Abb. 17 die gemessenen und berechneten Vertikalintensitätswerte entlang des Profils 32 wiedergegeben. In der oberen Abbildung ist der dazugehörige Modellstörkörper und die Topographie längs des Profils abgebildet. Die Länge des Profils wird auf der Abszisse, die topographische Höhe auf der Ordinate angegeben. Der Abstand zweier Punkte längs des Profils entspricht dem Meßpunktabstand, also 50 m. Die Darstellung der Topographie und der Gestalt der Störkörper ist im Verhältnis 1 : 2.5 verzerrt abgebildet. Der auffällig hohe Wert der Anomalie im Punkt 20 wird durch das Ausbeißen des Störkörpers an dieser Stelle hervorgerufen. Es ist also der Abstand Eckpunkt–Meßpunkt sehr gering, und da damit die Ungenauigkeit, verursacht durch eben diesen geringen Abstand, sehr groß sein würde, wurde für den Punkt 20 keine Annäherung des berechneten an den gemessenen Wert durchgeführt. Die Unregelmäßigkeit der Anomalie zwischen Punkt 24 und 28 konnte nur durch eine Kurve angenähert werden, deren Summe der Abweichungsquadrate der gerechneten zu den gemessenen Werten ein Minimum ergibt und die dem Verlauf der Anomalie entspricht. Die sich dabei ergebende durchschnittliche Abweichung beträgt 202 nT.

5. Zusammenfassung

Um die aeromagnetische Anomalie des Kropfrader Jochs zu untersuchen, wurden feld- und gesteinsphysikalische Messungen in diesem Bereich durchgeführt. Diese Messungen brachten Aufschlüsse über Quantität und Qualität des die aeromagnetische Anomalie hervorrufenden Störkörpers. Es wurden an ca. 3000 Punkten die Totalintensität und im engeren Bereich der Anomalie an ca. 1250 Punkten die Vertikalintensität des geomagnetischen Feldes gemessen. Die Vertikalintensitätsmessungen wurden besonders dicht durchgeführt, um auch die Details der Anomalie zu erfassen und damit eine genauere Störkörperberechnung zu ermöglichen. Darüber hinaus wurde an ca. 300 Aufschlüssen die

Suszeptibilität gemessen und an vier Bohrstellen 33 Bohrkernproben genommen, die im Labor weiter untersucht wurden.

Durch die voneinander unabhängigen Messungen der Vertikal- und Totalintensität war es möglich, unter Zuhilfenahme der im Labor bestimmten Intensität der remanenten Magnetisierung, in situ die remanente Deklination und Inklination zu bestimmen. Dies geschah durch die Transformation der gemessenen Totalintensitätswerte in die Vertikalkomponente durch Methoden der Potentialtheorie. Die so erhaltenen Vertikalintensitätswerte wurden mit den am selben Punkt gemessenen Vertikalintensitätswerten verglichen, und durch Variation der Richtung der induzierten und remanenten Magnetisierung bei der Transformation wurde versucht, die Summe der Abweichungsquadrate der einzelnen Meßpunkte zu minimieren und damit die Lage der Anomalien möglichst zur Übereinstimmung zu bringen. Durch die Kenntnis der resultierenden Deklination und Inklination und der durch gesteinsphysikalische Untersuchungen erhaltenen Intensität der remanenten Magnetisierung konnte die remanente Deklination (36°) und Inklination (42°) bestimmt werden.

Der dreidimensionalen Störkörperberechnung diente als Grundlage eine Arbeit von Talwani [6]. Er unterteilt den Störkörper in unendlich dünne Schichten und nähert die Umrisse dieser Schichten durch Polygonzüge an. Durch Bildung der Flächenintegrale und der numerischen Integration über alle Schichten wird die Wirkung des Störkörpers berechnet. Dabei kann es bei geringem Abstand Meßpunkt–Eckpunkt einer Schicht zu 1/R-Singularitäten kommen. Dies ist sicher ein Nachteil des Verfahrens von Talwani, so daß an dieser Stelle andere Verfahren bessere Ergebnisse erzielen können. In dieser Arbeit wurde nun versucht, dieses Verfahren zur dreidimensionalen Störkörperberechnung in ein Inversionsverfahren einzubauen. Dabei wurde nicht in der üblichen Weise vorgegangen, durch Bildung des totalen Differentials und anschließender Differentiation nach den Komponenten des Adjustierungsvektors ein System mit n-Gleichungen mit n-Unbekannten zu erhalten, sondern es wurde ein Gleichungssystem aufgestellt, in dem es immer nur eine Gleichung mit einer Unbekannten zu lösen gilt. Dadurch kann erheblich an Rechenzeit gespart werden, und es ist möglich, auch an kleineren Rechenanlagen eine Störkörperberechnung mit einigen hundert Eckpunkten durchzuführen.

Mit diesem automatischen Verfahren der kleinsten Quadrate wurde die Modellberechnung der Störkörper des Kropfrader Jochs durchgeführt. Die Berechnung der Anomalie ergab, daß sie durch die Wirkung zweier Störkörper mit unterschiedlichen Suszeptibilitäten ($20.000 \cdot 10^{-6}$ cgs-Einheiten für den stärker magnetisierten Störkörper, $8000 \cdot 10^{-6}$ cgs-Einheiten für den schwächer magnetisierten) hervorgerufen wird. Es wurde entlang von acht Profilen, die senkrecht zum Streichen des geologischen Körpers verliefen, durch Variieren der Eckpunkte der Schichten an diesen Profilen die Gestalt der beiden Störkörper im Bereich der großen Anomalie bestimmt. Der im Süden des Kropfrader Jochs gele-

gene, stärker magnetisierte ultramafitische Störkörper taucht gegen Osten hin ab, der nordöstlich davon gelegene, schwächer magnetisierte Störkörper verschob sich gegen Osten von der nördlichen Flanke des Bergrückens zur südlichen. Mit diesen Ergebnissen können Ansatzpunkte für eventuell weitere Untersuchungen zur Lagerstättenerschließung gegeben werden.

6. Anhang

Die hier verwendete Feldfortsetzung (nach [1]) setzt voraus, daß die Meßdaten alle in einer Ebene liegen, also f (x, y) eine Funktion der Meßebene $(z = 0)$ ist, die dann transformiert werden soll. Durch die unterschiedliche topographische Höhe der Meßpunkte im Gebiet des Kropfrader Jochs ist diese Bedingung nicht gegeben. Um nun die Ungenauigkeit, die dadurch hervorgerufen wird, zu untersuchen, wurde anhand eines Profils das Ergebnis der Feldfortsetzung (Z_f in Tabelle 6) mit dem Ergebnis der um den selben Betrag nach oben verschobenen Meßebene, unter der Annahme der errechneten Gestalt des Störkörpers (Z_v in Tabelle 6), verglichen. Es wurde hierfür die Vertikalkomponente des Profils 29 gewählt und um 150 m nach oben fortgesetzt – die Vertikalkomponente des Profils 29 deshalb, weil die Störkörperberechnung anhand der Vertikalintensitätsdaten durchgeführt wurde und das Profil 29 bereits über dem Zentrum des Störkörpers liegt, also weniger durch die etwas ungenauer erfaßten Ränder des Störkörpers bzw. durch die Wirkung anderer Störkörper beeinflußt wird.

Tabelle 6

Pkt.-Nr.	16	17	18	19	20	24	25	26
Z_v(nT)	103	177	287	436	613	759	615	447
Z_f (nT)	121	178	284	446	631	745	620	474
Pkt.-Nr.	27	28	29	30	31	32	33	34
Z_v (nT)	330	235	158	92	38	– 23	–101	–153
Z_f (nT)	325	189	91	24	– 31	– 73	– 99	–100

Die Vertikalintensitätsdaten, die durch die Verschiebung der Meßebene erhalten wurden, setzen die genaue Kenntnis des Störkörpers voraus. Da jedoch die Anpassung der errechneten Daten an die gemessenen Daten nicht ganz genau und vor allem die Kenntnis der Gestalt der Unterkante des Störkörpers mangelhaft ist, sind besonders im Bereich der Seitenminima größere Ungenauigkeiten möglich. Durch den Abstand Meßpunkt–Eckpunkt ist jeder errechnete Wert mit einer gewissen Ungenauigkeit behaftet bzw. die Lage des Eckpunktes nur zu einem gewissen Grad bestimmbar. Auch hierdurch können bei der Bestimmung der Vertikalintensitätswerte durch Verschieben der Meßebene Ungenauigkeiten auftreten. Dieses Beispiel soll zeigen, daß die Fehler unter-

schiedlicher topographischer Höhe im vorliegenden Fall unter der Toleranzgrenze liegen.

8. Literaturverzeichnis

[1] BARANOV, V.: Potential Fields and their Transformation in Applied Geophysics. Gebrüder Borntraeger, Berlin, Stuttgart, 1975.

[2] BOLT, B. A.: Methods in Computational Physics. Academic Press, New York und London, 1973.

[3] DAVOGG, B.: Geologische Untersuchungen an basischen Magmatiten im Westabschnitt der Nördlichen Grauwackenzone unter besonderer Berücksichtigung ihrer Eignung als natürliche Rohstoffe. Dissertation Universität Innsbruck, 1981.

[4] GEIGER, L., GUTENBERG, B., WIECHERT, E., und ZOEPPRITZ, K.: Über Erdbebenwellen. Nachrichten von der Königlichen Gesellschaft der Wissenschaften zu Göttingen, 1907, 1909, 1912, 1914, 1919.

[5] GUTDEUTSCH, R., SEIBERL, W., und STEINHAUSER, P.: Model Calculation over Selected Aeromagnetic Anomalies. EOS, 1979, p. 572.

[6] TALWANI, M.: Computation with the help of digital computer of magnetic anomalies caused by bodies of arbitrary shape. Geophysics *30*, 797–817, 1965.

Hersteller: Agens-Werk Geyer + Reisser, 1051 Wien, Arbeitergasse 1–7